

**RESULT LIST**

1 result found in the Worldwide database for:  
**EP0720720** as the publication number

**1 CHANNEL HEAT EXCHANGER**

**Inventor:** PAUL EBERHARD [DE]

**EC:** F28D9/00E; F28F1/32; (+6)

**Publication** EP0720720 (A1) - 1996-07-10

**info:** EP0720720 (B1) - 1998-01-21

**Applicant:** PAUL EBERHARD [DE]

**IPC:** F28D9/00; F28F1/32; F28F3/02; (+13)

**Priority Date:** 1993-09-27

Data supplied from the *espacenet* database — Worldwide

(19)



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11)

**EP 0 720 720 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
21.01.1998 Patentblatt 1998/04

(51) Int Cl.<sup>6</sup>: **F28D 9/00**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/DE94/01118**

(21) Anmeldenummer: **94928255.2**

(22) Anmeldetag: **27.09.1994**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 95/09338 (06.04.1995 Gazette 1995/15)**

(54) **KANALWÄRMETAUSCHER**

**CHANNEL HEAT EXCHANGER**

**ECHANGEUR DE CHALEUR A CANAUX**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT CH DK FR GB LI NL SE**

(30) Priorität: **27.09.1993 DE 4333904**  
**27.09.1993 DE 4333164**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**10.07.1996 Patentblatt 1996/28**

(73) Patentinhaber: **Paul, Eberhard, Dipl.-Ing.**  
**09350 Lichtenstein (DE)**

(72) Erfinder: **Paul, Eberhard, Dipl.-Ing.**  
**09350 Lichtenstein (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 0 393 937 WO-A-81/02060**  
**WO-A-82/00194 DD-C- 243 088**  
**DE-A- 2 513 505 FR-A- 2 464 678**  
**GB-A- 655 470**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**EP 0 720 720 B1**

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen Wärmetauscher für, insbesondere zwei, durchströmende Fluide mit parallelen Strömungskanälen, der im Querschnitt aus schichtenweise aufeinanderliegenden Tafeln mit mäanderförmigem Profil ausgebildet ist, wobei eine aufliegende Tafel die Strömungskanäle der darunterliegenden Tafel abdeckt und wobei jeweils seitlich benachbarte Strömungskanäle von unterschiedlichen Fluiden durchströmbar sind.

Ein derartiger Wärmetauscher ist aus der DD 243 088 A1 bekanntgeworden.

Bei Wärmetauschern der üblichen Serienfertigung wie Plattenwärmetauschern oder Spiralwärmetauschern bestehen häufig Abdichtprobleme der aneinander gepreßten Platten bzw. des Deckels am Spiralwärmetauscher, wodurch die Anwendbarkeit und der Gebrauchswert stark verringert sind. Daher wird bei Plattenwärmetauschern mit erheblichem Aufwand eine Verklebung, Verschweißung oder Verlötung der Platten vorgenommen, wodurch dann allerdings eine mechanische Reinigung der Strömungsquerschnitte nicht oder nur bedingt möglich ist.

Auch der aus der DD 243 088 A1 bekanntgewordene Wärmetauscher ist aus einzelnen einem s-förmig übereinandergelegten Profilblechstreifen aufgebaut, dessen Profil einen mäanderförmigen Querschnitt aufweist. Die Innenwinkel der vom mäanderförmigen Profil gebildeten offenen Trapeze sind allerdings größer als 90°, so daß eine aufliegende Tafel in die darunterliegende Tafel eingreifen und hineinrutschen kann. Bei höheren Druckdifferenzen zwischen den beiden Wärmetausch-Fluiden besteht eine erhöhte Gefahr, daß die Tafeln in ungewolltem Maße tiefer ineinanderrutschen. Dabei werden die Strömungsquerschnitte, Strömungsgeschwindigkeiten, effektiven Wärmetauschflächen und die statische Beherrschbarkeit des Gesamtgefüges in unkontrollierter Weise beeinflußt.

Jedoch erhöht sich bei dem aus der DD 243 088 A1 bekannten Wärmetauscher durch das Ineinanderrutschen benachbarter Tafeln die Anzahl der für einen Wärmetauscher einer bestimmten effektiven Wärmetauschfläche erforderlichen Tafeln und damit das Gewicht des Wärmeaustauschers pro Raumeinheit.

Der Erfindung liegt demgegenüber die Aufgabe zugrunde, einen Wärmetauscher der eingangs genannten Art derart weiterzubilden, daß die übereinanderliegenden Tafeln nicht mehr ineinander rutschen, sondern daß die Tafeln ohne stabilisierende Zwischenbleche übereinander liegen können und sich dabei ein stabiles Gesamtgefüge ergibt, wobei unter sparsamem Materialeinsatz mit dünnen Blechen eine maximale Wärmetauschfläche auf engem Raum erzielt wird.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Innenwinkel der vom mäanderförmigen Profil gebildeten offenen Trapeze kleiner als 90° sind.

Durch die erfindungsgemäß kleinen Innenwinkel

liegt eine Tafel jeweils auf der benachbarten darunterliegenden Tafel auf, so daß ein Ineinandergreifen benachbarter Tafeln gerade verhindert wird. Dies trägt zu einer Erhöhung der Stabilität bei größeren Druckunterschieden bei und führt zu einer Gewichtsreduzierung des Wärmetauschers. Der erfindungsgemäße Wärmetauscher ist somit ein kompakter Wärmetauscher mit hoher spezifischer Wärmetauschfläche, der für die verschiedensten Wärmetauschaufgaben zwischen gasförmigen und/oder flüssigen Medien sowie als Verdampfer, Kondensator und Strömungsreaktor mit exothermen und endothermen Prozessen anwendbar ist. Als Wärmetauscher zwischen gasförmigen Medien läßt sich der Wärmetauscher beispielsweise zur Abwärmenutzung aus Fortluft in Gebäuden, Werks- und Lagerhallen sowie in Kombination mit Dunstabzugshauben einsetzen. Den Wärmetauscher kann man zur Vorwärmung von Trockenluft in Trocknungsanlagen, für Vorheizen von Verbrennungsluft wie z.B. in Bäckereien, für Trocknungsvorgänge oder Umluftkühlung, für Kondensation in Wäschetrocknern, für Belüftung bei der Viehhaltung in Ställen sowie zu Wärmetauschzwecken in Kraftwerken und Abgasbehandlungsanlagen einsetzen. Für flüssige Medien kann der Wärmetauscher in Waschanlagen oder in Haushaltsgeräten wie Waschmaschinen, Geschirrspülautomaten verwendet werden. Weitere Anwendungsgebiete sind in der Klimatisierung, bei Kühlprozesse wie beispielsweise Steuerschrankkühlung oder Verdunstungskühlung, Kondensation, in der Verdampfungstechnik wie z.B. als Filmverdampfer, in Kälteanlagen, Gas-Durchlauferhitzern und in Heizkesseln, Umformstationen für Warmwasser und Dampf sowie in der Fahrzeugindustrie, beispielsweise für die Abwärmenutzung und Aufheizung des Fahrgastraumes. Desweiteren kann der Wärmetauscher in der Fahrzeugindustrie aufgrund seiner hohen Kompaktheit und geringen Größe hervorragend eingesetzt werden zur Wasservorwärmung für Scheiben- und Scheinwerferwaschanlagen und zur Ladeluftkühlung beim Turbolader-Motor. Der Wärmetauscher kann aus Aluminium, Stahl, Edelstahl, sonstigen Metallen und Legierungen, oder aus Kunststoffen oder Papier oder sonstigen Materialien bestehen.

Bevorzugt sind die Innenwinkel der vom mäanderförmigen Profil gebildeten offenen Trapeze größer als 70°, damit das Verhältnis zwischen Materialaufwand und Wärmeaustauschfläche des Strömungskanals möglichst optimal ist und das Verhältnis von Wärmeübergangszahl zu Gewicht bzw. Preis des Wärmetauschers möglichst groß gehalten wird.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterentwicklung sind alle Tafeln des Wärmetauschers aus einem einzigen fortlaufenden Streifen derart ausgebildet, daß die Strömungskanäle beider Fluide vollständig voneinander getrennt sind. Der fortlaufende Profilstreifen verläuft dazu beispielsweise schlangenoder S-förmig in oder rechtwinklig zur Durchströmrichtung.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform

des erfindungsgemäßen Wärmetauschers sind die Wandungen der Strömungskanäle angerauht und/oder mit die Strömung des durchströmenden Fluids beeinflussenden Strukturen versehen. Da bei einer Kanalströmung, insbesondere in größer dimensionierten glatten Kanälen, die Gefahr einer Verschlechterung des Wärmeübergangs durch eine laminare Grenzschicht des durchströmenden Fluids an den Wandungen besteht, führt die erfindungsgemäß angerauhte und/oder strukturierte Kanalwandung als strömungsspezifische Schikanen innerhalb des Strömungskanals z.B. zur Erzeugung von Turbulenzen oder Spiralströmungen oder Doppelspiralströmungen, wodurch der Wärmeaustausch zwischen den Fluiden erhöht bzw. optimiert wird.

Ganz besonders bevorzugt ist es, wenn immer wiederkehrende Anströmvorgänge innerhalb der Strömungskanäle dadurch erzeugbar sind, daß eine Tefel in Strömungsrichtung in bestimmten Abständen auf einer kurzen Länge in einen flachen Abschnitt, insbesondere mit einer Turbulenz erzeugenden Verprägung, übergeht.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung ist das Fluid über schrägflächen in die einzelnen Strömungskanäle ein- und/oder auslenkbar, so daß die Fluide in ausgewählte Strömungskanäle beispielsweise einer Strömungskanalebene oder nur einer Stirnseitenhälfte des Wärmetauschers eingeleitet werden können. Über die Anzahl der verschlossenen Absperrelemente läßt sich auch die Verweilzeit der Fluide in dem Wärmetauscher und damit die Wärmeübergangszahl einstellen und die Durchströmrichtung der Fluide beeinflussen. Somit ist auch eine hydraulische Reinigung möglich. Insbesondere können verstellbare Klappen die Strömungsführung und Wärmeaustauschleistung variieren. Diese Klappen lassen sich über Antriebe oder Magnete bewegen.

Wenn im Bereich der Ein- und Austrittsöffnungen der Strömungskanäle Strömungsleitelemente vorgesehen sind, über die die Fluide in die Strömungskanäle von außen einleitbar oder innerhalb des Wärmetauschers umleitbar sind, so lassen sich die Zu- und Ableitungen jedes Fluids unter beliebigen Winkeln in den Wärmetauscher ein- und ausleiten bzw. innerhalb des Wärmetauschers umleiten, wobei die Strömungsdruckverluste minimiert werden.

Durch die spitzwinklige Stirnseiten-Bauform läßt sich aber auch ohne diese Strömungsleitelemente die Ein- bzw. Ableitung des Fluids stirnseitig und auch seitlich, also im 90° -Winkel realisieren. Dazu sind erfindungsgemäß im Gehäuse und an den stirnseitigen, V-förmigen Abdichtelementöffnungen Dichtungen und Filter vorgesehen.

Besonders bevorzugt sind ein Strömungsverteiler und ein Strömungsvereiniger für ein Fluid jeweils als ein in Durchströmrichtung über den gesamten Querschnitt der Strömungsebene(n) sich erstreckender ebener Kanalabschnitt ohne Strömungskanäle ausgebildet und die Strömungskanäle des anderen Fluids in dieser(n)

Strömungsebene(n) an ihren jeweiligen Enden, insbesondere mit einer Schrägfläche, verschlossen sind. Dann strömt das in den Wärmetauscher z.B. über dessen gesamte Querschnittsfläche eingeleitete Fluid in alle geöffneten Strömungskanäle ein, ohne in die Strömungskanäle des anderen Fluids zu gelangen. So kann ein nur über einen Öffnungsquerschnitt in den Wärmetauscher einströmendes Fluid auf alle gewünschten Strömungskanäle im Wärmetauscher zu einem Schachbrett ähnlichen Strömungsquerschnitt verteilt werden und so bei geringem Strömungs-Druckverlust, da keine 90°-Umlenkung, ein maximaler Wärmeaustausch erzielt werden.

Erfindungsgemäß ist das die Strömungskanäle bildende Profil an seinen jeweiligen Enden zu einer Ebene zusammengedrückt. Im Tiefziehverfahren hergestellte Profilbleche mit spitzwinkligtrapezförmigem Querschnitt lassen sich leicht zusammendrücken, so daß sich mit einem mäanderförmigen Grundprofil auch bestimmte Strömungskanäle verschließende Strukturen leicht herstellen lassen.

Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn zwei benachbarte, jeweils zu einer Ebene zusammengedrückte Profile aus ihrer jeweiligen Ebene zu einer die Strömungsebene verschließenden Stirnwand abknickbar sind.

Wenn die Kanalabschnitte jeweils eine nur für ein Fluid offene Stirnseitenhälfte aufweisen und diese ein- und austrittsseitigen Stirnseitenhälften eines Fluids vorzugsweise diagonal in Durchströmrichtung gegenüberliegen, so wird der erfindungsgemäße Wärmetauscher diagonal durchströmt und hinsichtlich des Wärmetauschers ein Strömungskurzschluß unterbunden. Außerdem wird mit dieser strömungstechnisch günstigen, fast geradlinigen Durchströmung der Druckverlust gegenüber bekannten Gegenstrom-Bauformen gesenkt.

Besonders bevorzugt sind die die Strömungskanäle bildenden Tafeln in einem, vorzugsweise auch zerlegbaren, Gehäuse anordenbar, was den Zusammen- und Auseinanderbau sowie die Reinigung der einzelnen den Wärmetauscher bildenden Teile erleichtert. Bei dem Einsatz eines stirnseitig abnehmbaren V-förmigen Abdichtelementes ist das Wärmetauscherpaket auch aus einem einteiligen Gehäuse sehr leicht herausnehmbar.

Ganz besonders bevorzugt sind mehrere Wärmetauscher seitlich und/oder in Form eines Baukastensystems und/oder über Eck aneinander koppelbar, so daß Anpassungen an vorgegebene Geometrien, z.B. Volumenströme und Wärmeaustauschleistungen, möglich sind.

In den Rahmen der Erfindung fällt auch ein Rippenwärmetauscher, bei dem ein Fluid, z.B. Luft, parallele Strömungskanäle mit Rechteckprofil, Trapezprofil bzw. überhöhten Trapezprofil oder ähnlichen Profilstückteilen durchströmt. Der Wärmeaustausch mit einem anderen Fluid, z.B. mit einer Flüssigkeit, erfolgt, indem die Flüssigkeit über Rohre etc. durch den Rippenwärmetauscher hindurch oder an seinen Außenflächen entlang geführt wird.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der Beschreibung und der beigegeführten Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter aufgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder in beliebiger Reihenfolge miteinander verwendet werden. Die erwähnten Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter.

Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1a schematisch den Querschnitt des erfindungsgemäßen Wärmetauschers mit parallelen, spitzwinkligtrapezförmigen Strömungskanälen, umgeben von einem Gehäuse;

Fig. 1b schematisch die Verteilung zweier Fluide A und B in den Strömungskanälen der Fig. 1a, sowie den angedeuteten zweidimensionalen Wärmetransport;

Fig. 2a in perspektivischer Ansicht die Strömungskanäle der Fig. 1b mit zwei im Gegenstromverfahren durchströmenden Fluiden A und B;

Fig. 2b-e in einer der Fig. 2a entsprechender Ansicht die Strömungskanäle des Wärmetauschers jeweils mit in Durchströmrichtung verschieden strukturierten Kanalwandungen;

Fig. 3a zwei Strömungsebenen zweier Fluide in Explosionsdarstellung mit für das andere Fluid verschlossenen Strömungsteilern;

Fig. 3b den Strömungsverlauf der beiden Fluide entlang der Ebene IIIb-IIIb der Fig. 3a;

Fig. 3c den aus dem spitzwinkligen Trapezprofil erzeugten quasi-ebenen Einströmbe-  
reich entlang der Ebene IIIc-III3c der Fig. 3a;

Fig. 4 in perspektivischer Ansicht Strömungskanäle mit zwei im Gegenstrom und in abwechselnde Strömungsebenen eingeleiteten Fluiden;

Fig. 5 in perspektivischer Ansicht Strömungskanäle mit unterbrochenen Strömungskanälen und seitlicher Ausleitung eines Fluids;

Fig. 6a,b in perspektivischer Ansicht einen Wär-

metauscher mit die äußeren Strömungskanäle seitlich teilweise abschließenden Seitenwänden und mit seitlicher Einleitung eines Fluids;

Fig. 6c

schematisch die Ein- und Ausflußrichtungen der beiden Fluide gemäß den Fig. 6a und b;

Fig. 7a-d

einen Wärmetauscher mit zerlegbarem Gehäuse und mit V-förmigen Stirnseiten des Wärmetauscherpakets sowie die Durchströmrichtungen der Fluide und desweiteren ein flexibles Verbindungselement;

Fig. 8

einen Wärmetauscher mit zerlegbarem Gehäuse, mit rechtwinkligen Stirnseiten des Wärmetauscherpakets und mit seitlichen Öffnungen;

Fig. 9

einen analog zu dem der Fig. 7a gestalteten Wärmetauscher in einem einteiligen Gehäuse;

Fig. 10

in perspektivischer Teilansicht Strömungskanäle eines Rippen-Wärmetauschers mit rechtwinklig zur Luft-Durchströmrichtung hindurchtretenden Rohren runden Querschnitts;

Fig. 11

die Strömungskanäle der Fig. 27 mit Rohren länglichen Querschnitts.

Fig. 12

einen Rippenwärmetauscher für zwei in verschiedenen Ebenen getrennt und rechtwinklig zueinander strömende Fluide; und

Fig. 13a-c

verschiedene mögliche Profilformen des Strömungskanalquerschnitts für Wärmetauscher, Raumheizkörper und Rippenwärmetauscher.

Der in Fig. 1a mit 1 bezeichnete Wärmetauscher weist ein Gehäuse 2 auf, in welchem mittels eines fortlaufenden Blechstreifens 3 Strömungskanäle 4 für beispielsweise zwei Fluide A, B ausgebildet sind. In der Zeichnung bezeichnet jeweils ein ausgefüllter Pfeil das Fluid A, ein nicht-ausgefüllter Pfeil das Fluid B. Der Blechstreifen 3 weist ein mäanderförmiges Profil auf, dessen offene Innenwinkel  $\theta$  kleiner als  $90^\circ$  sind. Innerhalb des Gehäuses 2 ist der mäanderförmige Blechstreifen 3 selbst derart schlangen- oder S-förmig angeordnet, daß parallele Strömungskanälebenen ausgebildet werden. Dabei liegt das Blechprofil einer Strömungsebene auf dem darunterliegenden Blechprofil auf, wie es bei 5 schematisch angedeutet ist. Die beiden

Längskanten 6a, b des Blechstreifens 3 sind entweder miteinander oder mit dem Gehäuse 2 leckagefrei verbunden, so daß seitlich benachbarte Strömungskanäle 4 jeweils von einem anderen Fluid vollständig und hermetisch durch Blech voneinander getrennt durchströmt werden. Wie in Fig. 1b gezeigt ist, findet eine Durchmischung der die Strömungskanäle 4 durchströmenden Fluide A, B nicht statt. Durch die nahezu quadratische Struktur der Strömungskanäle 4 erfolgt der Wärmeaustausch zwischen den beiden Fluiden A, B jeweils an vier Seiten eines Kanals 4, wie es durch die Doppelpfeile 7 angedeutet ist. Die Wärmeaustauschfläche läßt sich gegenüber einem lediglich aus parallelen Platten bestehenden Wärmetauscher verdoppeln.

Um den Wärmeaustausch weiter zu erhöhen, durchströmen die beiden Fluide A, B nach Fig. 2a die Strömungskanäle 4 in entgegengesetzter Strömungsrichtung. Bei einer Kanalströmung, vor allem in größer dimensionierten Strömungskanälen mit glatten Wandungen, wie es in Fig. 2a gezeigt ist, besteht die Gefahr einer Verschlechterung des Wärmeübergangs zwischen den beiden Fluiden A, B durch die Ausbildung jeweils einer laminaren Grenzschicht des durchströmenden Fluids an der glatten Wandung. Die Fig. 2b bis e zeigen quer und schräg zur Durchströmrichtung der Strömungskanäle 4 ausgebildete Strömungsschikanen in Form von Furchen 8a bis 8d, über die sich das Strömungsverhalten der durchströmenden Fluide beeinflussen läßt. So führen die rechtwinklig zur Durchströmrichtung der Fluide verlaufenden Furchen 8a, d zu Turbulenzen, während die schräg zur Durchströmrichtung verlaufenden Furchen 8b zu einer einfachen Spiralströmung 8b' und die V-förmigen oder fischgräten-ähnlichen Furchen 8c zu einer doppelten Spiralströmung 8c' führen. Diese strukturierten Kanalwandungen verhindern eine laminare Grenzschicht und verbessern den Wärmeaustausch zwischen beiden Fluiden A, B.

Fig. 3a zeigt eine Explosionsdarstellung der ansonsten übereinanderliegenden Profilbleche. Die Darstellung zeigt, wie das Profil von der quasi-ebenen flachen Platten (siehe Fig. 3c) in die mäanderförmige Profilstruktur übergeht, wobei der Übergang z.B. von der Ebene 9 zum "Trapez-Dach" 10 über die schräge Auströmlflächen 10a erfolgt; analog dazu erfolgt der Übergang zum "Trapez-Tal". Der Strömungsverlauf in diesem Übergangsbereich (Kanalverteiler) ist aus der Schnittdarstellung Fig. 3b ersichtlich, wobei deutlich erkennbar ist, daß der Eintritt des Mediums A von einem ebenen, flachen Spalt (erste Strömungsebene) in die Kanäle zweier Strömungsebenen (Teilströme A' und A" gemäß Fig. 4) erfolgt, wodurch das in Fig. 4 gut dargestellte schachbrettartige Strömungsprofil entsteht. Eintritts- und austrittsseitig der Strömungskanäle sind die Erhebungen 10 mit einer Abschlußfläche, im Ausführungsbeispiel mit einer gewölbten Anströmlfläche 10a abgeschlossen, um den Eintritt des anderen Fluids in Durchströmrichtung zu verhindern. Auf diese Weise läßt sich der bei glatten Wärmetauschern erreichbare Wär-

meaustausch steigern. Wie Fig. 3b zeigt, werden durch die Erhebungen 10 die Fluidströme A, B jeweils in zwei Teilströme A', A" bzw. B', B" geteilt und parallel zueinander im Strömungskanal zwischen bzw. auf den Erhebungen 10 geführt.

Die in Fig. 4 gezeigten Strömungskanäle 4 unterscheiden sich von denen der Fig. 1a dadurch, daß an der Außenseite diagonal benachbarte Strömungskanäle 4a, b eines Fluids miteinander über Öffnungen 11 verbunden sind. Dies ist in der hinteren Ansicht der Fig. 4 für die äußeren Strömungskanäle 4a, b dargestellt. Der vordere Teil der Fig. 4 zeigt das getrennte Einströmen der beiden Fluide A, B in benachbarten Strömungsebenen im Gegenstromverfahren. Wie in den Fig. 3a und b gezeigt, wird das Einleiten eines Fluids in die Strömungskanäle 4a, 4b dadurch erreicht, daß Erhebungen 10 mit verschlossenen Schrägflächen 10a vorgesehen sind. Der Fluidstrom A wird über die Schrägfläche 10a in einen ersten Teilstrom A' und einen zweiten Teilstrom A" aufgespalten. In der für das eine Fluid offenen Strömungsebene sind die Querschnitte der Strömungskanäle des anderen Fluids über Schrägflächen 12 ganz verschlossen. Auf diese Weise können die beiden Fluide A, B getrennt voneinander in für sie jeweils offene Strömungsebenen 4<sub>A</sub>, 4<sub>B</sub> eingeleitet und in die vorgesehenen Strömungskanäle des jeweiligen Fluids verteilt werden.

Da sich der Wärmeaustausch im laminaren Bereich in der Anströmphase erhöht, ist eine immer wieder unterbrochene Strömung von Vorteil. Dieses kann durch immer wiederkehrende Anlaufvorgänge im Strömungskanal 4 oder, wie Fig. 5 zeigt, in einer Strömungsebene dadurch erreicht werden, daß in bestimmten Abständen die Strömungskanäle 4 auf einer kurzen Länge in einen flachen Kanal 13 zwischen zwei Schrägflächen 12a, b wie bei einem Plattenwärmetauscher übergehen und von dort die Strömung erneut in die Strömungskanäle 4 verteilt wird. Fig. 5 zeigt außerdem, daß die beiden im Gegenstromverfahren die Strömungskanäle 4 durchströmenden Fluide A, B entweder stirnseitig (Fluid A) oder von der Seite (Fluid B) in verschiedene Strömungsebenen eingeleitet werden können. Durch den allen Strömungskanälen 4 einer Strömungsebene voran gestellten gemeinsamen Kanalabschnitt 14 sind alle Strömungskanäle 4 eines Fluids in dieser Strömungsebene miteinander verbunden. Das in diese Strömungsebene eingeleitete Fluid verteilt sich gleichmäßig auf die einzelnen Strömungskanäle 4.

Das seitliche Abdichten der nach außen offenen Strömungskanäle 4 erfolgt entweder durch eine glatte Seitenwand 15a oder durch eine entsprechend den Strömungsebenen profilierte Seitenwand 15b (Fig. 6a). Die Einleitung der Fluide A, B in dieser Ausführungsform erfolgt durch seitliche Öffnungen 16 in den Seitenwänden 15a, b. Da die Strömungsebenen des anderen Fluids mit einer aus der S-förmigen Übereinanderlegung des Profilblechstreifens resultierenden Biegekante verschlossen sind, kann das Fluid über den gesamten

offenen Querschnitt 16 der Seitenwände 15 zugeleitet werden. Die Ableitung der Fluide erfolgt gemäß Fig. 6a über die Stirnseite der Strömungskanäle 4, so daß die Ein- und Ausleitung der beiden Fluide A, B jeweils rechtwinklig zueinander verlaufen. Bei einem in Strömungsrichtung S-förmig übereinandergelegten Profilblechstreifen, wie in Fig. 6b dargestellt, sind die profilierten Seitenteile 15b mit entsprechenden Aussparungen versehen. Fig. 6c verdeutlicht nochmals die jeweils rechtwinklig zueinander verlaufenden Ein- und Austrittsrichtungen der Fluide A, B im Wärmetauscher 1.

In Fig. 7a ist ein zerlegbarer Wärmetauscher 101 gezeigt, der aus zwei miteinander verbindbaren Gehäusehälften 102a, b, einem Strömungskanäle 104 bildenden Profilblech 103 sowie Deckel 117 mit Strömungslenkelementen 117a besteht. An ihren ein- bzw. austrittsseitigen Enden weisen die identisch ausgebildeten Gehäusehälften 102a, b zwei vorzugsweise quadratische Öffnung 118a, b sowie zwei Seitenöffnungen 119a, b auf, in die die Deckel 117 (mit und ohne Strömungslenkelemente 117a) einsetzbar sind. Vorzugsweise sind das Gehäuse 102, 602, die Deckel 117, 617, die Lücke 627 sowie Verbindungsrippe 6 aus Kunststoff und über eine Schnappverbindung lösbar und einfach miteinander zu verbinden. Die Stirnseiten 103' des Profilbleches 103 sind V-förmig ausgebildet und liegen im verbundenen Zustand der beiden Gehäusehälften 102a, b formschlüssig an ebenfalls V-förmigen Anschlägen 102' innerhalb der jeweiligen Gehäusehälfte 102a, b an, wobei zur Abdichtung vorzugsweise eine Dichtung eingelegt wird, die der Abdichtfläche 102 angepaßt ist. Die Strömungslenkelemente 117a bestehen aus im Abstand voneinander angeordneten parallelen Leitblechen 117a' und einer oder zwei Abdeckfläche(n) 117b. Vorzugsweise betragen sowohl der Stirnwinkel  $\beta$  der V-förmigen Stirnseite des Profilbleches 103 und der Ablenkwinkel der Strömungslenkelemente 117  $45^\circ$ , so daß die Fluide zwischen den Leitblechen 117a über die Stirnseiten des Wärmetauschers 101 parallel zur Durchströmrichtung ein- bzw. herausgeleitet werden können, wie in den Fig. 7a, b gezeigt ist. Werden die Deckel mit Strömungslenkelementen 117a in die stirnseitigen Öffnungen eingesetzt, können die seitlich eintretenden Fluide A, B ebenfalls parallel zur Durchströmrichtung in den Wärmetauscher 101 eingeleitet werden. Fig. 7c zeigt die für ein Fluid jeweils geöffneten und durch Stirnseitenstreifen verschlossenen Strömungsebenen 4<sub>A</sub>, 4<sub>B</sub>, die denen der Fig. 4 mit Ausnahme der V-förmigen Stirnseite entsprechen. Über Befestigungsmittel in Form von mit Vorsprüngen 120 am Wärmetauscher 101 angreifenden Feststellbügel 121 können die beiden Gehäusehälften 102a, b leicht miteinander verbunden bzw. gelöst werden. Über einen ähnlichen Feststellmechanismus zwischen Vorsprüngen 117c an den Deckeln 117 und Feststellbügel 121' lassen sich auch die Deckel 117 leicht befestigen bzw. lösen. Den Längsschnitt des zusammengebauten Wärmetauschers 101 zeigt Fig. 7d, wobei hier ein flexibles Zwischenstück 121 zur verbes-

serten Dehnungsaufnahme und Montage eingebaut ist. Dieses Zwischenstück kann ebenso am Wärmetauscher-Ende angebracht werden.

In Fig. 8 ist eine weitere Ausführungsform eines Wärmetauschers 201 gezeigt, bei der die in Fig. 7a einteiligen Gehäusehälften 102a, b ihrerseits durch zwei Gehäuseviertel 202a', a'', b', b'' ausgebildet sind. Die einzelnen Gehäuseviertel 202 sowie die stirnseitige Abdeckung 222 und die die seitlichen Öffnungen 219 abdeckenden Seitenabdeckungen 223 werden mit Feststellbügel 221 befestigt, die ihrerseits mit Vorsprüngen 220 bzw. 217c an den Gehäusevierteln 202a, b und an den Stirnseiten 217c zusammenwirken. Die im zusammengebauten Zustand des Wärmetauschers 201 an das Wärmetauscherpaket gepreßten Gehäuseteile sind jeweils mit Dichtungsmitteln 224 abgedichtet. Das Profilblech 203 besteht an den Enden aus rechtwinkligen Stirnseiten 203'. Die stirnseitigen Abdeckungen 222 mit Vorsprüngen 217c werden mittels Dichtung 224 und Spannmitteln dicht mit dem Gehäuse verbunden.

Fig. 9 zeigt einen analog zu Fig. 7a gestalteten Wärmetauscher 103 in einem Gehäuse 602, welches allerdings einteilig ist. Die Explosionsdarstellung zeigt, daß das Gehäuse 602 aus einem durchgängigen, rechteckigen Kanal 602 besteht, der einfach als Ziehteil herstellbar ist. Die Abdichtung an der V-förmigen Stirnseite 103' erfolgt über ein herausnehmbares V-förmiges Abdichtelement 623, das stirnseitig und seitlich vorzugsweise quadratische und gleichgestaltete Öffnungen 618' aufweist, die das Ein- bzw. Ausströmen sowohl stirnseitig als auch seitlich ermöglicht. Die Arretierung der V-förmigen Abdichtelemente im Gehäuse erfolgt durch das Einstecken eines Deckels 617 oder sonstigen Verbindungselementes 626, 627 durch die seitliche Gehäuseöffnung 619 in die seitliche Öffnung 619' des V-förmigen Abdichtelementes 623 hinein, wo das Einsteckelement lösbar einschnappt. Auf diese Weise ist im Bauteilsystem mit einfachen Mitteln ein wartungsfreundlicher, multivalenter Einsatz des Wärmetauschers möglich.

Zwischen der Dichtfläche 602' des V-förmigen Abdichtelementes 623 und der V-förmigen Stirnseite 103' des Wärmetauschers ist zur Abdichtung eine 8-förmige Rahmendichtung 624 vorgesehen. Diese Dichtung 624 kann einseitig vollflächig 625 sein, so daß ein eintretendes Medium gleichzeitig gefiltert wird.

Um zwei unterschiedliche Wirkweisen (Dichten und Filtern) mit einem Material realisieren zu können, wird dieses Material 624, 625 an der aktiven Abdichtfläche an der Oberfläche oder/und inwandig derart behandelt, daß eine Undurchlässigkeit für das vorbeiströmende Medium und damit eine gute Abdichtwirkung erreicht wird.

Die Verbindung zwischen Gehäusen (Baukastenform) und zwischen Gehäuse mit V-förmigem Verbindungselement 625 und Verbindungselementen (wie beispielsweise Verbindungsrippen, flexible Verbindungselemente 651, Bogenstücke 626, Übergangs-

stücke 627 von rund auf eckig-symmetrisch oder asymmetrisch), Lüftungsgitter an den Öffnungen, Kondensat-Abführelemente, Decke (617 usw.) wird vorzugsweise über eine lösbare Schnappverbindung realisiert, die vorzugsweise aus Steck-Teil 628 und Aufnahme-(Buchsen-)Teil 628' besteht.

Die Fign. 10 und 11 zeigen einen Rippenwärmetauscher 701, bei dem die Rippen hin- und hergewendet sind und eine rechteckähnliche Profilstruktur besitzen. Beim Hin- und Herwenden und somit beim Übereinanderlegen des profilierten Blechstreifens 703 entsteht eine schachbrettähnliche Struktur mit sehr hoher Wärmeaustauschfläche pro Raumeinheit. Die Strömungskanäle 704 werden von einem, insbesondere gasförmigen, Fluid A wie Luft durchströmt, wobei der Wärmeaustausch mit einem, insbesondere flüssigen Fluid B stattfindet, das in Rohren 705, 705' rechtwinklig zu den Strömungskanälen 704 das Profilblech 703 hindurchströmt. Die Rohre 705, 705' haben entweder einen runden (Fig. 10) oder einen länglichen Querschnitt (Fig. 11).

Die Vorzüge des Rippenwärmetauscher 701 sind darin zu sehen, daß auf der Luftseite der Wärmeübergang intensiviert wird. Bedingt dadurch, daß bei Flüssig-Luft-Wärmetauschern auf der Luftseite medienbedingt nur ein wesentlich geringerer Wärmeübergang möglich ist, sollte die Wärmeaustauschfläche auf der Luftseite (Wärmetauschrippen) so gestaltet werden, daß auf engem Raum eine möglichst große Wärmeaustauschfläche untergebracht wird, die im günstigsten Fall gleichzeitig in sich strukturiert sein sollte, um die Wärmeübergangszahl auf der Luftseite zu erhöhen. Dieses Ziel läßt sich mit dem profilierten Blechstreifen 703 erzeugen, bei dessen Profilform keine parallelen Rippen entstehen, sondern durch das Hin- und Herwenden und Übereinanderlegen eine schachbrettähnliche Struktur entsteht. Durch eine zusätzliche Strukturierung ist die Kanalwandung gewellt oder andersartig strukturiert, damit Turbulenzen oder Spiralströmungen entstehen. Durch die Rippenprofilierung wird die am Wärmetausch aktiv beteiligte Rippenfläche um ca. 60% erhöht. Damit kann bei gleichen äußeren Abmessungen eines Rippenwärmetauschers die Wärmeaustauschfläche und damit die Kompaktheit und Wärmeaustauschleistung wesentlich erhöht werden, oder bei Beibehaltung einer geforderten Wärmeaustauschfläche wird der gesamte Rippenwärmetauscher in seinen äußeren Abmessungen wesentlich kleiner.

In Fig. 12 ist eine andere Ausführung eines Rippenwärmetauschers 701' gezeigt, der von zwei gasförmigen Fluiden A, B rechtwinklig und in voneinander getrennten Strömungskanälen durchströmt wird. Durch die große Profilfläche des Fluid A läßt sich auch hier der Wärmeaustausch mit dem Fluid B steigern.

Wie die Fign. 13a bis 13c zeigen, kann das Rippenprofil ein Rechteckprofil, ein Trapezprofil, ein überhöhtes Trapezprofil, wobei die Trapezkegel spitzwinklig sind, oder ähnliche Profile sein.

## Patentansprüche

1. Wärmetauscher (1) für, insbesondere zwei, durchströmende Fluide (A, B) mit parallelen Strömungskanälen (4), der im Querschnitt aus schichtenweise aufeinanderliegenden Tafeln mit mäanderförmigem Profil ausgebildet ist, wobei eine aufliegende Tafel die Strömungskanäle (4) der darunterliegenden Tafel abdeckt und wobei jeweils seitlich benachbarte Strömungskanäle (4) von unterschiedlichen Fluiden durchströmbar sind, dadurch gekennzeichnet, daß die Innenwinkel  $\theta$  der vom mäanderförmigen Profil gebildeten offenen Trapeze kleiner als  $90^\circ$  sind.
2. Wärmetauscher nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Innenwinkel  $\theta$  größer als  $70^\circ$  sind.
3. Wärmetauscher nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß alle Tafeln des Wärmetauschers (1) aus einem einzigen fortlaufenden Streifen (3) derart ausgebildet sind, daß die Strömungskanäle (4) beider Fluide (A, B) vollständig voneinander getrennt sind.
4. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Wände der Strömungskanäle (4) angeraut sind und/oder mit die Strömung des durchströmenden Fluids (A, B) beeinflussenden Strukturen (8a, 8b, 8c, 8d) versehen sind.
5. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß immer wiederkehrende Anströmvorgänge innerhalb der Strömungskanäle (4) dadurch erzeugbar sind, daß eine Tafel in Strömungsrichtung in bestimmten Abständen auf einer kurzen Länge in einen flachen Abschnitt (13), insbesondere mit einer Turbulenz erzeugenden Verprägung, übergeht.
6. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Fluid über Schrägflächen (12a, b) in die einzelnen Strömungskanäle (4) ein- und/oder auslenkbar ist.
7. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß im Bereich der Ein- und Austrittsöffnungen der Strömungskanäle (4) Strömungsleitelemente (117a) vorgesehen sind, über die die Fluide (A, B) in die Strömungskanäle (4) von außen einleitbar oder innerhalb des Wärmetauschers (101) umleitbar sind.
8. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein



Strömungsverteiler und ein Strömungsvereiniger für ein Fluid jeweils als ein in Durchströmrichtung über den gesamten Querschnitt der Strömungsebene(n) sich erstreckender ebener Kanalabschnitt (14; 114)) ohne Strömungskanäle ausgebildet sind und daß die Strömungskanäle (4; 104) des anderen Fluids in dieser(n) Strömungsebene(n) an ihren jeweiligen Enden, insbesondere mit einer Schrägfläche (12a), verschlossen sind.

9. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das die Strömungskanäle (4) bildende Profil an seinen jeweiligen Enden zu einer Ebene (9) zusammengedrückt ist.

10. Wärmetauscher nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß zwei benachbarte, jeweils zu einer Ebene (9) zusammengedrückte Profile aus ihrer jeweiligen Ebene zu einer die Strömungsebene verschließenden Stirnwand (16b) abknickbar sind.

11. Wärmetauscher nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Kanalabschnitte (114) jeweils eine nur für ein Fluid offene, vorzugsweise V-förmige, Stirnseitenhälfte (103') aufweisen und daß diese ein- und austrittseitigen Stirnseitenhälften (103') vorzugsweise diagonal in Durchströmrichtung gegenüberliegen.

12. Wärmetauscher nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die die Strömungskanäle (4) bildenden Tafeln in einem, vorzugsweise zerlegbaren, Gehäuse (2; 102; 602) anordnenbar sind.

13. Bausatz aus Wärmetauschern nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Wärmetauscher seitlich und/oder hintereinander und/oder über Eck aneinander koppelbar sind.

## Claims

1. Heat exchanger (1), especially for two through-running fluids (A, B) with parallel channels (4), which cross-sectionally consists of meander-like profile sheets arranged in layers, whereas the sheet respectively located above covers the channels (4) of the sheet respectively located below, and whereas laterally neighboured channels (4) can be flown through by different fluids, characterized by the fact that the interior angles  $\theta$  of the open trapezoids formed by the meander profile are smaller than  $90^\circ$ .
2. Heat exchanger as described under 1., characterized by the fact that the interior angles  $\theta$  are greater

than  $70^\circ$ .

3. Heat exchanger as described under 1. or 2., characterized by the fact that all sheets (1) of the heat exchanger are designed as one continuous strip (3) in such a way that the channels (4) for both fluids (A, B) are completely separated from each other.
4. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that the walls of the channels (4) are roughened and/or have structured patterns (8a, 8b, 8c, 8d) which influence the flow of the through-running fluids.
5. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that constantly recurring flowing processes inside the channels (4) can be generated by means of a method in which one sheet moves into a flat section (13) in the direction of flow over a short distance in certain intervals, especially with a shape that generates turbulences.
6. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that a fluid can be led into or out of the individual channels (4) via inclined planes (12a, b).
7. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that flow guide elements (117a) are installed in the area of the channel inlet and outlet openings of the channels (4). By means of these flow guide elements the fluids (A, B) can be led into the channels (4) from outside, or by-passed inside the heat exchanger (101).
8. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that a flow distributor together with a flow collector form a plane channel section (14; 114) without channels covering the complete cross-section of the flow level(s) in the direction of flow for one fluid, and that the channels (4; 104) of the other fluid at this/these flow level(s) are locked at their respective ends by means of an inclined plane (12a).
9. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that the profile forming the channels (4) is pressed together at its ends on one level (9).
10. Heat exchanger as described under 9., characterized by the fact that two neighboured profiles which are pressed together on one level each can be bent from their respective levels to an end wall (16b) which locks the flow level.

11. Heat exchanger as described under 8., characterized by the fact that the channel sections (114) only have one preferably V-shaped half of a end wall (113') each which is open for one fluid, and that these halves of end walls (113') located on the inlet and outlet respectively are positioned diagonally opposite to each other in the direction of flow.

12. Heat exchanger as described under one of the previous items, characterized by the fact that the sheets forming the channels (4) can be arranged inside a housing (2; 102; 602) that is preferably dismountable.

13. A set of heat exchanger modules as described under one of the previous items 1, to 12, characterized by the fact that several heat exchangers can be coupled with each other either next to each other and/or in fine and/or cornerwise.

### Revendications

1. L'échangeur thermique, (1) pour deux fluides circulants (A, B) en particulier, ayant des canaux d'écoulement parallèles (4) qui, de profil, apparaissent sous forme d'une couche de plaques superposées dessinant des méandres, chaque plaque supérieure recouvrant les canaux d'écoulement (4) de la plaque sous-jacente et, l'ensemble des canaux d'écoulement (4) longeants pouvant être emprunté par des fluides différents; le tout caractérisé par le fait que les angles intérieurs  $\theta$  des trapèzes ouverts, formés par les plaques en méandres, sont inférieurs à  $90^\circ$

2. L'échangeur thermique selon la demande N°1 est caractérisé par le fait que les angles intérieurs  $\theta$  sont supérieurs à  $70^\circ$ .

3. L'échangeur thermique selon les demande N°1 et 2, caractérisé par le fait que toutes les plaques de l'échangeur thermique (1) composées d'une seule bande continue (3) sont disposées de sorte que les canaux d'écoulement (4) des deux fluides (A, B) soient complètement séparés l'un de l'autre.

4. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées se caractérisant par le fait que les parois des canaux d'écoulement (4) sont rugueuses et/ou qui sont équipées de structures (8a, 8b, 8c, 8d) régulant l'écoulement du fluide (A, B).

5. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées caractérisé par le fait que les afflux répétitifs dans les canaux d'écoulement (4) peuvent être générés puisqu'une plaque posée dans le sens de l'écoulement passe à intervalles déterminés et

sur une courte longueur, à une section plate (13), ceci accompagné par une compression engendrant un tourbillon.

6. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées se caractérisant par le fait qu'un fluide peut être introduit dans les différents canaux d'écoulement et/ou évacué par des surfaces inclinées (12 a, b).

7. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées caractérisé par le fait que dans la zone des orifices d'entrée et de sortie des canaux d'écoulement (4), des éléments d'acheminement (117 a) sont disposés par lesquels les fluides (A, B) peuvent être introduits de l'extérieur dans les canaux d'écoulement (4) ou ils peuvent être détournés dans l'échangeur thermique (101).

8. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées caractérisé par le fait qu'un distributeur d'écoulement et un convergeur d'écoulement pour le premier fluide sont constitués sous forme d'une section plate du canal (14; 114)) et sans canaux d'écoulement qui s'étend dans le sens de l'écoulement et sur toute la longueur de la / des surfaces d'écoulement, et que les canaux d'écoulement (4; 104) du second fluide de cette / ces surfaces d'écoulement sont fermés à leurs extrémités respectives, surtout celles qui présentent une surface inclinée (12A).

9. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées caractérisé par le fait que le profil formant les canaux d'écoulement est aplati (9) à ses extrémités respectives.

10. L'échangeur thermique selon la demandes N°9 caractérisé par le fait que les deux profils longeants et aplatis (9) peuvent être pliés vers la paroi d'about (16b) qui ferme la surface d'écoulement

11. L'échangeur thermique selon la demandes N°8 caractérisé par le fait que les sections de canal (114) présentent la moitié de la paroi d'about (103') sous forme de V de préférence qui n'est ouverte que pour un seul fluide et que les moitiés de parois d'about (103') sur les côtés d'entrée et de sortie sont disposés de préférence en diagonal et dans le sens de l'écoulement.

12. L'échangeur thermique selon une des demandes susmentionnées caractérisé par le fait que les plaques formant les canaux d'écoulement (4) peuvent être aménagées de préférences dans un boîtier démontable (2; 102; 602).

13. Jeu de pièce d'échangeurs thermiques selon une

des demandes de 1 à 12 caractérisé par le fait que plusieurs échangeurs thermiques peuvent être branchés latéralement et / ou l'un derrière l'autre et / ou en diagonal.

5

10

15

20

25

30

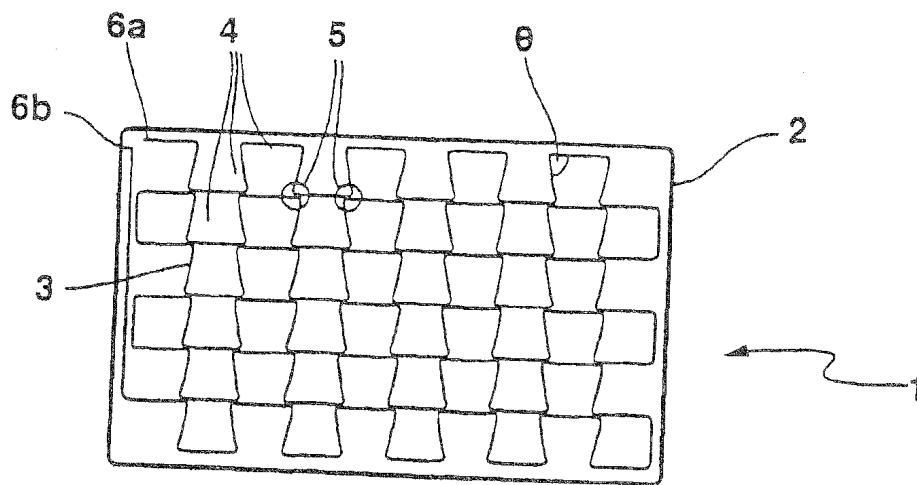
35

40

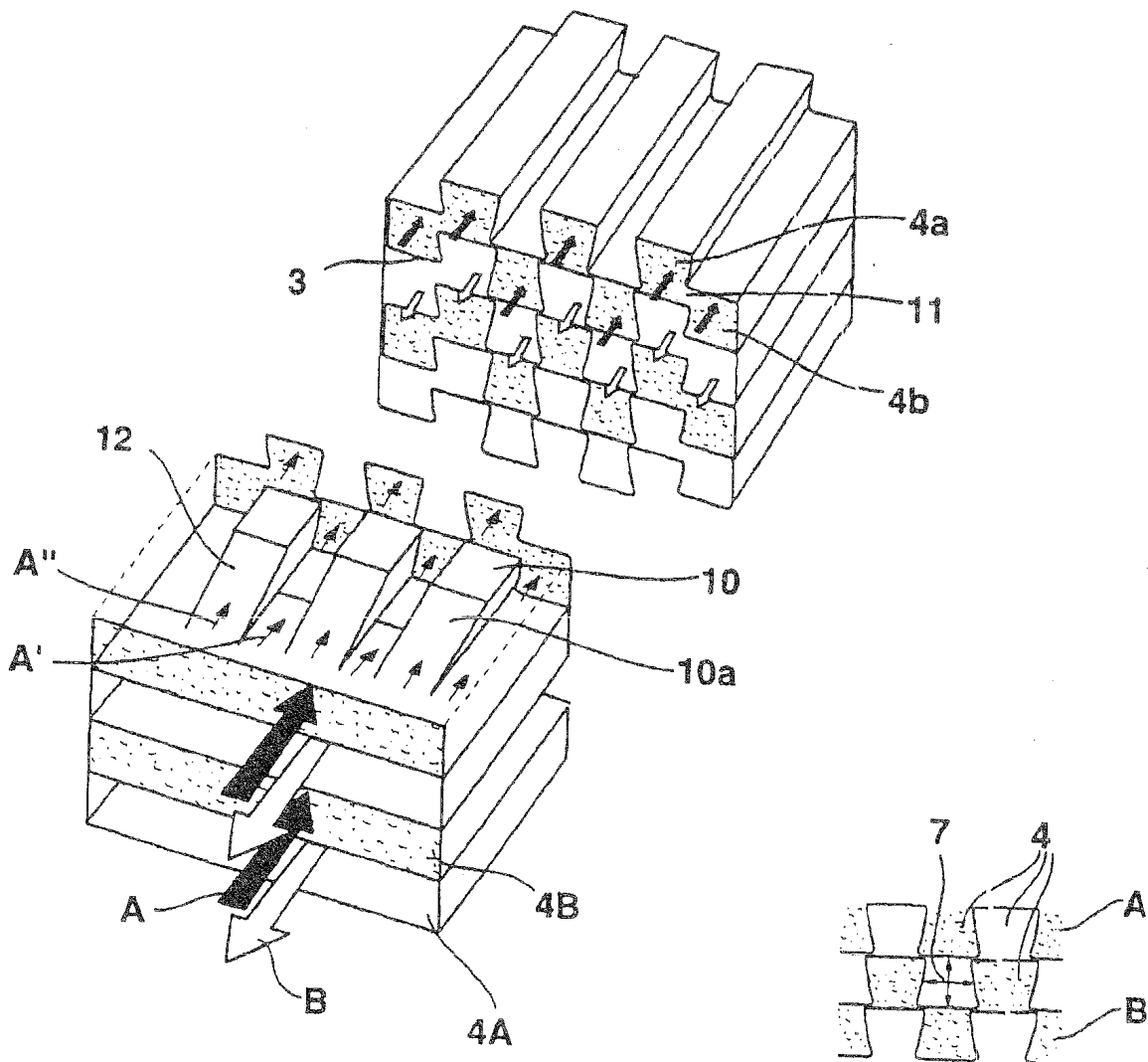
45

50

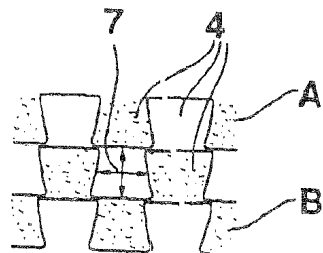
55



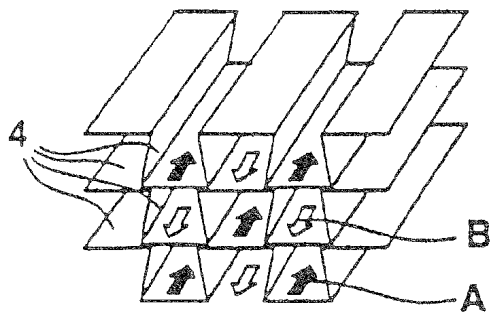
**Fig. 1a**



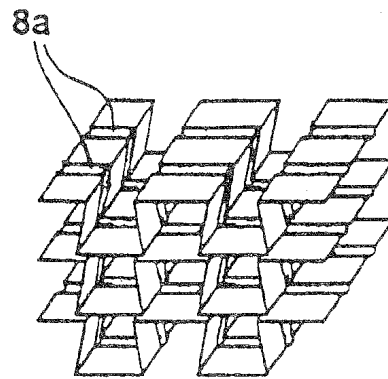
**Fig. 4**



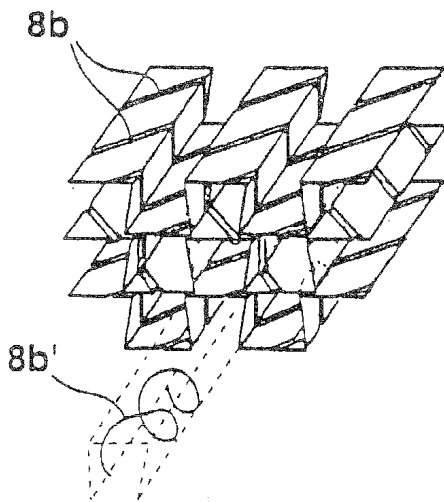
**Fig. 1b**



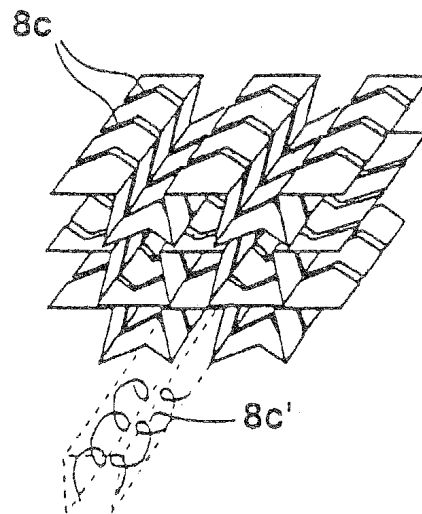
**Fig. 2a**



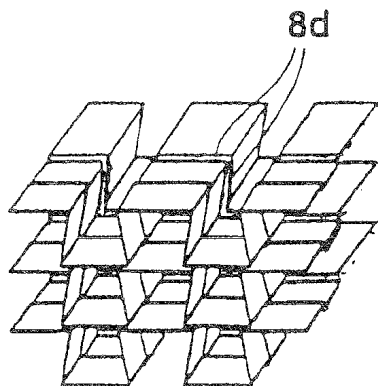
**Fig. 2b**



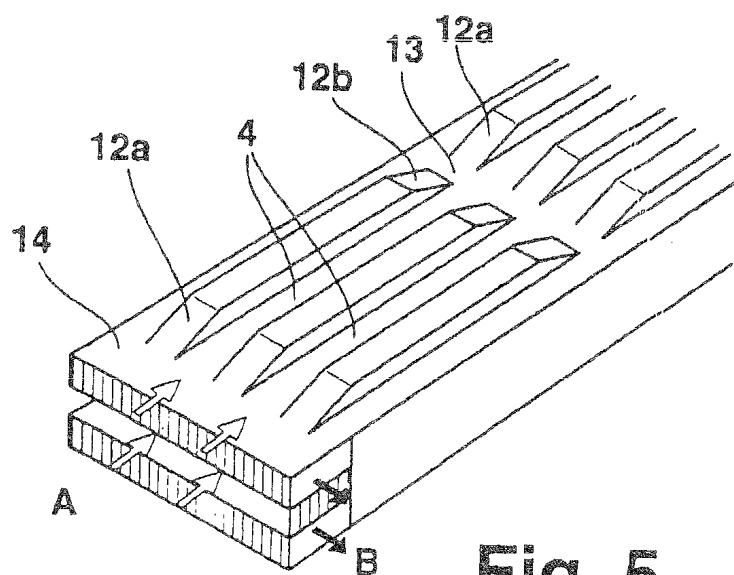
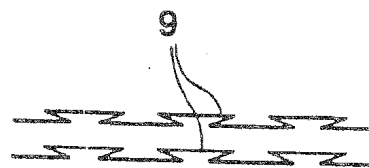
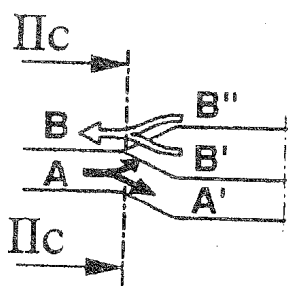
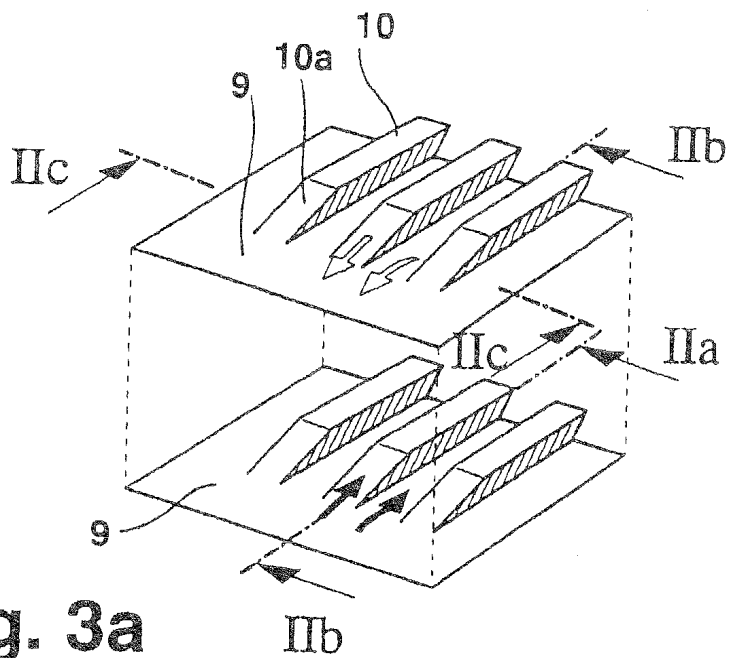
**Fig. 2c**

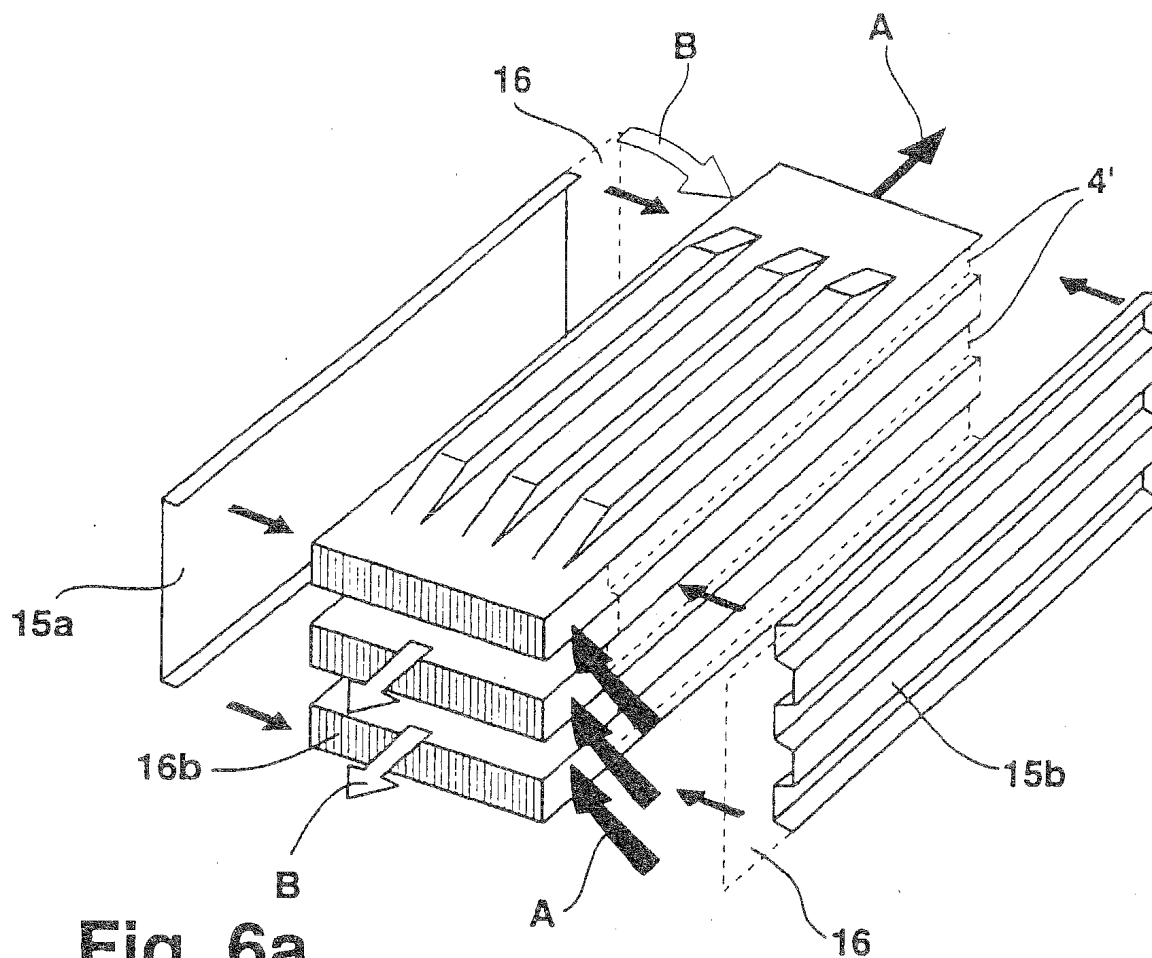


**Fig. 2d**

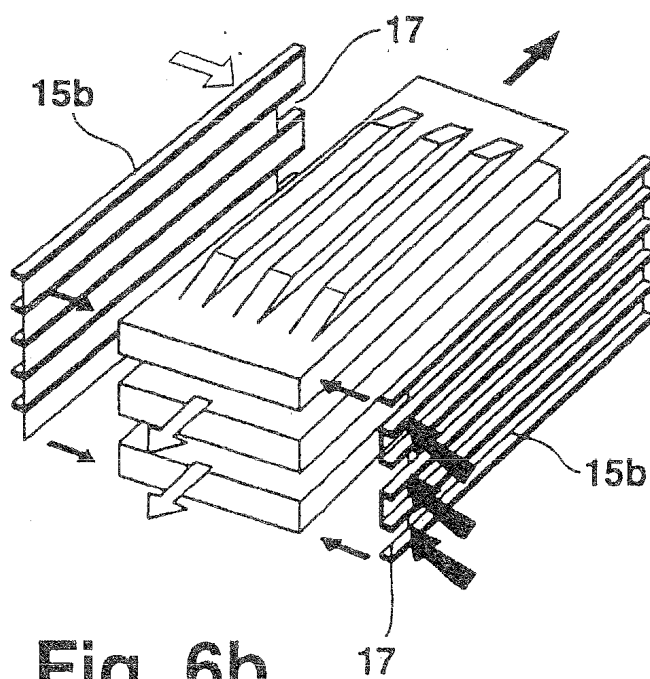


**Fig. 2e**

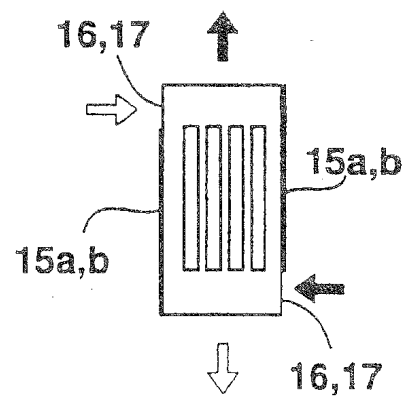




**Fig. 6a**



**Fig. 6b**



**Fig. 6c**

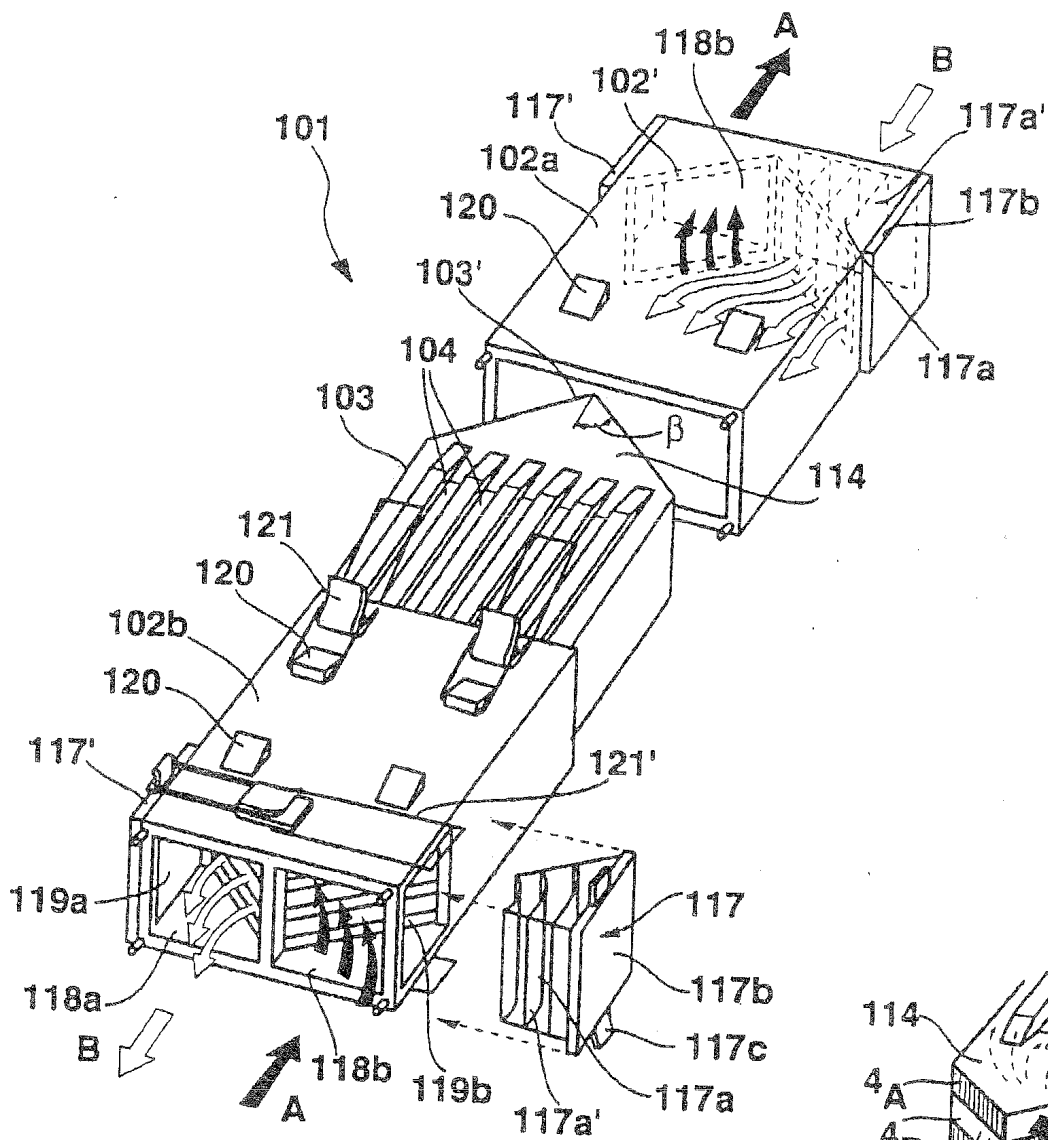


Fig. 7a

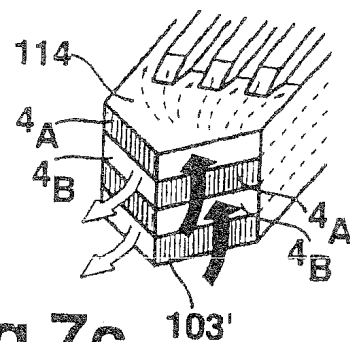


Fig. 7c

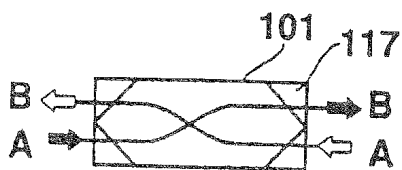


Fig. 7b

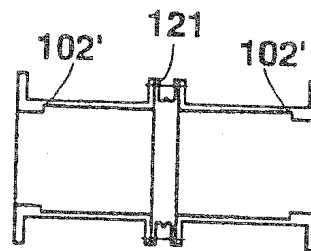


Fig. 7d



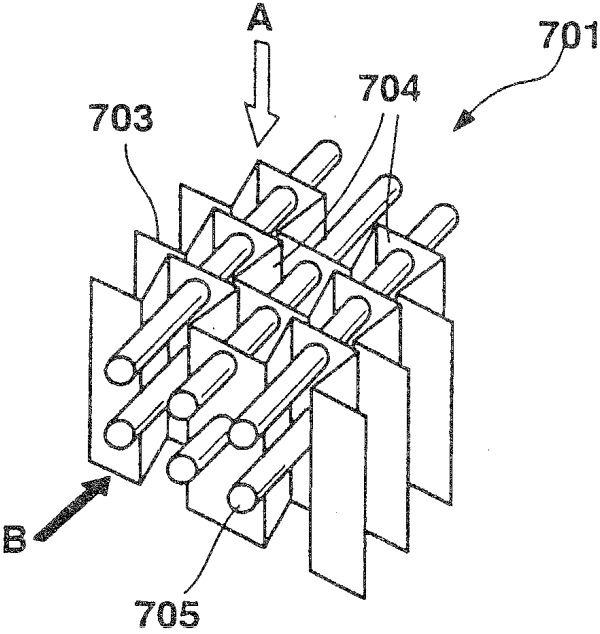


Fig. 10

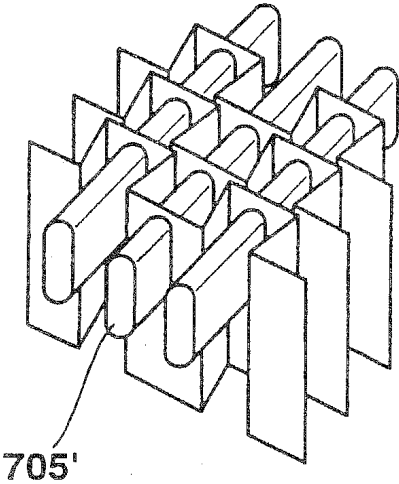


Fig. 11

